

刘华军, 孙亚男, 陈明华. 雾霾污染的城市间动态关联及其成因研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(3): 74-81. [LIU Huajun, SUN Yanan, CHEN Minghua. Dynamic correlation and causes of urban haze pollution [J]. China population, resources and environment, 2017, 27(3): 74-81.]

雾霾污染的城市间动态关联及其成因研究

刘华军¹ 孙亚男² 陈明华¹

(1. 山东财经大学经济学院, 山东 济南 250014; 2. 山东财经大学工商管理学院, 山东 济南 250014)

摘要 面对严重的雾霾天气以及雾霾污染边界不断扩张的严峻挑战, 加快创新大气污染联防联控体系以形成跨区域协同治污合力势在必行。本文基于京津冀、长三角、珠三角、成渝、长中游等五大地区 96 个城市 2015 年的空气质量指数(AQI)以及 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 、 O_3 等 6 种分项污染物的逐日数据, 从时间序列数据“预测能力”的视角, 在向量自回归模型框架下识别雾霾污染的城市间动态交互影响效应, 运用社会网络分析方法刻画雾霾污染空间关联的网络结构特征。在此基础上, 运用二次指派程序从分项污染物视角考察雾霾污染空间关联的关键诱因, 并利用双变量 Moran 指数揭示雾霾污染与其影响因素之间的空间相关性。研究发现, 城市雾霾污染之间存在普遍的动态关联关系且呈现出联系紧密、稳定性强、带有明显特征的多线程复杂网络结构形态。不论在地区内部还是在全部样本城市当中, 均不存在孤立的节点, 这意味着面对雾霾污染的空间关联网络, 任何一个城市都不能独善其身, 均受到来自地区内部和地区以外其他城市以及它们构成的空间关联网络的影响。在六种分项污染物中, $PM_{2.5}$ 的空间关联是导致雾霾污染空间关联的最主要诱因。城市雾霾污染与其影响因素尤其是城市人口密度、投资强度、工业污染排放之间存在显著的空间相关性。基于上述结论, 中国应当加快构建以防控 $PM_{2.5}$ 为重点的跨区域雾霾污染协同治理机制, 并将其融入城市群发展战略以及区域发展战略之中, 最终实现包含雾霾污染协同治理在内的全方位的区域协同发展。

关键词 雾霾污染; 动态关联; 社会网络分析; 协同治理

中图分类号 F205 **文献标识码** A **文章编号** 1002-2104(2017)03-0074-08 **doi**: 10.3969/j.issn.1002-2104.2017.03.009

当前, 中国已经成为世界上大气污染最严重的地区之一, 尤其是经济发达、人口密集的京津冀、长三角、珠三角、成渝以及长中游等地区已经成为中国大气污染的重点区域。2015 年 12 月以来, 华北地区多次出现大面积的严重雾霾天气, 多个城市连续启动了霾红色预警。更为严峻的是, 雾霾污染边界的不断扩张使得在一个污染严重的区域内部没有任何一个城市的空气质量能够独善其身, 多个城市之间的动态关联构成了一个以城市为节点的复杂网络。城市雾霾污染的空间关联网络给大气污染防治提出严峻挑战, 按照行政区划边界的环境管理模式与雾霾污染区域性特征之间的矛盾不断加剧, 仅从行政区划的角度考虑单个城市雾霾污染防治的“各自为战”的环境管理和污染治理模式已经难以有效解决当前愈加严重的区域雾霾污染问题^[1], 加强区域联防联控以形成跨区域协同治污合力势在必行。

从相关领域研究进展看, 大量文献基于空气质量模型

证实了污染物可以实现跨界传输^[2-3], 部分研究基于空间统计技术刻画了污染物的空间分布和空间关联特征^[4-5], 或者应用时间序列统计和计量经济技术描述污染物的时间变动规律^[6-12]。然而, 受样本数据及研究方法的限制, 现有研究尚未揭示出雾霾污染在更大空间尺度上的动态关联。在此背景下, 揭示雾霾污染的动态关联特征, 并深入探究雾霾污染空间关联的成因, 对于完善雾霾污染的跨区域协同治理机制具有重要的理论价值和现实意义。

本文以京津冀、长三角、珠三角、成渝、长中游等五大地区的 96 个城市为样本, 采用 2015 年环保部发布的城市空气质量指数(Air Quality Index, AQI)以及 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 、 O_3 等六种分项污染物日报数据, 从时间序列数据“预测能力”的视角, 在向量自回归框架下构建了区域雾霾污染的动态交互影响模型, 实证考察雾霾污染的动态关联效应。在此基础上, 构建雾霾污染空间关联网络并运用社会网络分析(Social Network Analysis, SNA)方法

收稿日期: 2016-09-27

作者简介: 刘华军, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为资源环境经济、绿色发展、空间网络分析。E-mail: huajun99382@163.com。

基金项目: 国家社会科学基金项目“资源环境约束下农业用水效率评价及提升路径研究”(批准号: 15CGL041); 山东省高校人文社科研究项目“山东省城市绿色发展效率及其协同提升路径研究”(批准号: J16YE02); 山东省自然科学基金项目“山东省雾霾污染的城市间动态关联效应及协同治理机制研究: 基于社会网络分析视角”(批准号: ZR2016GM03)。

刻画其结构特征。在揭示雾霾污染动态关联效应的基础上,运用二次指派程序(Quadratic Assignment Procedure, QAP)方法从分项污染物视角揭示雾霾污染空间关联的关键诱因,并利用双变量 Moran 指数揭示雾霾污染与其影响因素之间的空间相关性,最终为雾霾污染的跨区域协同治理提供对策建议。

1 模型构建与样本数据

1.1 雾霾污染的区域间动态交互影响模型

伴随区域开放不断深化,区域(城市、城市群)之间的空间关联愈发紧密,这已经被大量经验研究文献所证实,而且区域之间的空间关联不仅仅体现在经济方面,在能源、环境领域的联系也日趋紧密^[13-14]。对于雾霾污染的空间联系,基于空气质量模型的研究已经表明污染物可以实现跨界传输。在大气环流以及经济发展等因素的作用下,雾霾污染的相互影响不仅体现在排放量巨大的一次污染物在距离较近的城市之间输送、转化和耦合,某些污染物尤其是形成 $PM_{2.5}$ 的污染物可以跨越城市甚至省际的行政边界而实现远距离输送,这就意味着雾霾污染不再是发生在单个区域的孤立的污染现象,区域雾霾污染之间存在一定相关性^[15]。在大气环流等自然条件的作用下,雾霾污染往往会在区域间传导,某个区域的雾霾污染可能会成为另一区域雾霾污染的诱因,或加剧另一区域雾霾污染的程度,这为从时间序列研究视角探索区域雾霾污染的动态关联提供了新的契机。

从时间序列数据角度,一个区域雾霾污染的变动可能引起其他区域雾霾污染的变动,换言之,某个区域雾霾污染可能“领先”(preceding)于其他区域,因此该区域对其他区域的雾霾污染具有一定的“预测”能力。本文通过构造向量自回归模型(VAR)来揭示区域雾霾污染之间的动态关联。

考虑两个区域 x 、 y 雾霾污染的时间序列分别为 $\{x_t\}$ 、 $\{y_t\}$,为了检验两个区域雾霾污染之间的动态关联关系和交互影响,构造下面两个 VAR 模型:

$$x_t = \alpha_1 + \sum_{i=1}^m \beta_{1,i} x_{t-i} + \sum_{i=1}^n \gamma_{1,i} y_{t-i} + \varepsilon_{1,t} \quad (1)$$

$$y_t = \alpha_2 + \sum_{i=1}^p \beta_{2,i} x_{t-i} + \sum_{i=1}^q \gamma_{2,i} y_{t-i} + \varepsilon_{2,t} \quad (2)$$

其中, α_j 、 β_j 、 γ_j ($j=1,2$) 为待估参数, $\{\varepsilon_j, t\}$ ($j=1,2$) 为残差项,满足 $\{\varepsilon_j, t\} \sim N(0,1)$ 。 m 、 n 、 p 、 q 为自回归项的滞后阶数。方程(1)检验区域 x 的雾霾污染是否受到自身以及区域 y 雾霾污染滞后期的影响;方程(2)则检验区域 y 的雾霾污染是否受到自身以及区域 x 雾霾污染滞后期的影响。在 VAR 模型框架下,可以通过检验自回归项系数的联合显著性来识别变量间的动态关联效应。具体的,若

方程(1)中虚拟假设 $H_0: \gamma_{1,1} = \gamma_{1,2} = \dots = \gamma_{1,n} = 0$ 被拒绝,则意味着 y 的滞后值有助于解释 x ,即 y “领先”于 x ,两个区域雾霾污染的动态关联关系可以直观的表示为“ $y \rightarrow x$ ”。同理,若方程(2)中虚拟假设 $H_0: \gamma_{2,1} = \gamma_{2,2} = \dots = \gamma_{2,q} = 0$ 被拒绝,则意味着 x 的历史值有助于解释 y ,即 x “领先”于 y ,两个区域雾霾污染的动态关联关系可以表示为“ $x \rightarrow y$ ”。若上述两个方程中的虚拟假设均被拒绝,表明 x 和 y 存在双向关联关系,则两个区域雾霾污染的关联关系可以表示为“ $x \leftrightarrow y$ ”。需要指出的是,上述检验均适用于平稳序列,对于非平稳时间序列需要进行差分直至平稳后再进行检验。

1.2 社会网络分析方法

在区域内部,雾霾污染在多个城市之间的动态关联关系将形成多线程的复杂网络。社会网络分析(SNA)为揭示雾霾污染空间关联的网络结构特征提供了可行工具。社会网络分析以“关系”作为基本分析单位,以图论工具、代数模型技术描述关系模式,是一种针对“关系数据”的跨学科分析方法,近年来其应用领域已经逐渐从社会学向经济学、管理学等领域拓展^[16-17],成为一种新的研究范式^[18-19]。本文将借助 SNA 工具来刻画雾霾污染空间关联的网络结构特征,并利用 SNA 中的 QAP 方法从分项污染物的角度揭示城市雾霾污染动态关联的成因。

1.3 样本数据

本文以 AQI 作为衡量城市雾霾污染的综合指标。同时也考虑了 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 、 O_3 等六种分项污染物。本文以实施新空气质量的京津冀、长三角、珠三角、成渝、长中游等五个地区 96 个城市为研究样本。选择这五个地区的原因在于,它们是中国经济规模最大、人口最为密集的国家级城市群所在区域,其雾霾污染形势相比其他地区更为严峻。上述 96 个样本城市的污染数据全部来源于环保部数据中心,分项污染物数据则根据当天环保部环境监测总站每小时数据的均值计算而得。数据时期跨度为 2015 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日,全部观测值为 $365 \times 96 \times 7 = 245\ 280$ 个。此外,区域雾霾污染根据该地区内部所有城市污染物数据的算术平均测得。

2 雾霾污染的城市间动态关联及其网络结构特征

在对城市雾霾污染的空间动态关联关系进行识别之前,首先对城市 AQI 及六种分项污染物日报数据构成的时间序列进行单位根检验。检验结果表明,所有序列在 5% 的显著性水平下均拒绝了存在单位根的原假设,满足 VAR 变量平稳性的要求。在此基础上,本文在 VAR 模型框架下对两两城市之间雾霾污染的动态关联关系进行了

识别,并通过构建城市雾霾污染空间关联的复杂网络模型来揭示其网络结构特征。节点、关系、连线是复杂网络模型的三个基本要素。本文选择城市作为节点;按照 5% 的显著性水平作为阈值来确定城市节点之间的动态关联关系进而确定城市节点之间的连线。依据上述方法,针对 AQI 及六种分项污染物,本文分别构建了五个地区以及全部 96 个样本城市雾霾污染的空间关联网络,表 1 报告了网络结构特征指标的测算结果。图 1 则以京津冀的 AQI 为例对雾霾污染的动态关联进行了可视化。由图 1 可以发现,雾霾污染之间呈现多线程的复杂网络结构形态。

2.1 雾霾污染空间关联网络的整体紧密程度

(1) 从 AQI 的网络密度看,不论五大地区内部还是全部样本城市,AQI 的网络密度均超过了 0.65,这意味着雾霾污染在地区内部和地区之间均存在非常紧密的空间关联,而且空间关联已不仅仅局限于地区内部的临近城市之间,

表 1 雾霾污染空间关联的网络结构特征
Tab. 1 Network characteristics of spatial pollution of haze pollution

指标	污染物	京津冀	长三角	珠三角	成渝	长中游	全部城市
网络密度	AQI	0.750 0	0.689 3	0.678 6	0.694 4	0.736 4	0.654 3
	PM _{2.5}	0.743 6	0.713 7	0.726 2	0.750 0	0.754 5	0.703 1
	PM ₁₀	0.737 2	0.682 3	0.704 8	0.666 7	0.690 9	0.639 0
	SO ₂	0.859 0	0.641 7	0.500 0	0.500 0	0.672 7	0.599 5
	CO	0.833 3	0.598 7	0.447 6	0.541 7	0.527 3	0.603 0
	NO ₂	0.756 4	0.707 3	0.685 7	0.652 8	0.800 0	0.743 3
	O ₃	0.756 4	0.609 2	0.440 5	0.583 3	0.645 5	0.544 4
网络效率	AQI	0.015 2	0.064 6	0.052 6	0.000 0	0.000 0	0.083 5
	PM _{2.5}	0.030 3	0.058 5	0.042 1	0.000 0	0.022 2	0.067 6
	PM ₁₀	0.015 2	0.065 9	0.026 3	0.035 7	0.044 4	0.090 0
	SO ₂	0.000 0	0.086 6	0.210 5	0.285 7	0.111 1	0.153 9
	CO	0.015 2	0.072 0	0.321 1	0.178 6	0.244 4	0.139 1
	NO ₂	0.015 2	0.029 3	0.078 9	0.107 1	0.022 2	0.047 3
	O ₃	0.045 5	0.158 5	0.321 1	0.178 6	0.177 8	0.270 8
平均距离	AQI	1.250 0	1.311 0	1.350 0	1.403 0	1.318 0	1.349 0
	PM _{2.5}	1.295 0	1.286 0	1.274 0	1.250 0	1.245 0	1.299 0
	PM ₁₀	1.269 0	1.321 0	1.300 0	1.250 0	1.240 0	1.362 0
	SO ₂	1.141 0	1.365 0	1.519 0	1.597 0	1.345 0	1.401 0
	CO	1.167 0	1.405 0	1.679 0	1.514 0	1.618 0	1.397 0
	NO ₂	1.244 0	1.293 0	1.314 0	1.347 0	1.200 0	1.257 0
	O ₃	1.244 0	1.398 0	1.565 0	1.406 0	1.300 0	1.468 0

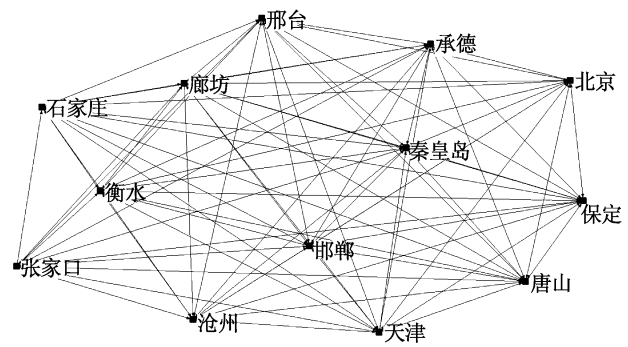


图 1 京津冀地区雾霾污染的空间关联网络
Fig. 1 Spatial correlation network of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region

而是呈现出多线程、多城市、跨地区的网络分布态势。在五大地区中,京津冀和长中游地区 AQI 的网络密度超过 0.70,京津冀地区 AQI 的网络密度最高,而长中游地区 AQI 的网络密度略低于京津冀地区。珠三角地区 AQI 的网络密度最低,不过也达到 0.67 以上,长三角和成渝地区 AQI 的网络密度略高于珠三角地区。而全部样本城市 AQI 的网络密度均低于五大地区,这说明雾霾污染在地区内部城市之间的关联要比全部样本城市之间的关联更为紧密。

(2) 从分项污染物的网络密度看,除了珠三角地区的 CO 和 O₃ 的网络密度低于 0.50 之外,五大地区及全部样本城市六种分项污染物的网络密度均超过了 0.50,这意味着不同的污染物在城市之间也存在非常紧密的关联关系。相对于其他四种分项污染物,PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的网络密度在地区之间的差别不大,说明两种污染物在不同地区的空间关联特征比较一致,因此不同地区在防控 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 方面可以采取类似的防控措施。而对于其他四种分项污染物,因为它们的网络密度在不同地区之间存在较大差异,制定具有地区特点的防控措施就显得非常必要。

(3) 在 AQI 及六种分项污染物的空间关联网络中,均不存在孤立的节点,这意味着面对雾霾污染空间关联网络,任何一个城市都不能独善其身,均受到来自地区内部和地区以外其他城市以及它们构成的空间关联网络的影响。换言之,当前中国的雾霾污染问题已成为所有城市共同面对的困境,虽然部分地区如京津冀、长三角和珠三角已初步构建了大气污染联防联控机制,但上述机制仅仅局限于地区内部,这种局部的大气污染治理并不能从根本上解决中国整体上的雾霾污染问题。因此,要跳出“单个地区”的空间概念,从更大的空间范围内实施大气污染的协同防控,为此,在局部地区雾霾污染已经实施联防联控的基础上,中国亟需加快建立跨区域的雾霾污染联防联控机制。

2.2 雾霾污染空间关联网络的稳定性

在社会网络分析中,通常采用网络效率来刻画网络稳定性。网络效率越低,网络中就存在越多的冗余连线,网络的稳定性就越强。表1报告了五大地区和全部城市AQI及六种分项污染物的网络效率。①从AQI的网络效率看,五大地区及全部城市样本AQI的网络效率均小于0.10,这表明不论在五大地区内部还是在全部样本城市中,90%以上的连线是“冗余”的,也就是说,城市雾霾污染之间的动态关联关系存在严重的多重叠加现象,说明雾霾污染动态关联均具有较强的网络稳定性。同时,通过对比可以发现,五大地区内部AQI的网络效率均低于全部样本城市AQI的网络效率,说明AQI在五大地区内部的关联网络相对于全部样本来说具有更强的稳定性,这就进一步为地区内部率先开展雾霾污染的联防联控进而构建跨区域的联防联控体系提供了科学依据。②从分项污染物的网络效率看,PM_{2.5}和PM₁₀具有较低的网络效率。因此,单个城市采取的污染防治措施所能取得的效果必然受到关联网络的制约,亟需加快构建以细微颗粒物为重点的雾霾污染联防联控机制。

2.3 雾霾污染空间关联网络的小世界特征

在社会网络分析中,通常采用“平均距离”来定量揭示网络的小世界特征。根据表1的测度结果,五大地区内部及全部样本城市的AQI及六种污染物空间关联的平均距离均处于1—2之间,即使平均距离最大的珠三角地区的CO,其关联网络的平均距离也只有1.6790。这一结果表明,不论是地区内部还是全部样本城市,AQI及六种分项污染物在任意两个城市节点之间通过1—2个中间城市就完全可以建立联系,雾霾污染空间关联网络呈现明显的小世界特征。空间关联网络的小世界特征促进了雾霾污染之间的联系和交互影响,实施雾霾污染联防联控的必要性更加凸显。

3 城市雾霾污染空间关联的成因分析

3.1 雾霾污染空间关联的成因:基于分项污染物视角

为了从分项污染物角度揭示城市雾霾污染空间关联的成因,本文以AQI的空间关联网络(矩阵形式)作为被解释变量,以六种分项污染物的空间关联网络作为解释变量,通过构建计量模型定量考察雾霾污染空间关联的成因。由于计量模型中的被解释变量和解释变量都是矩阵形式的“关系数据”,而传统的统计分析和回归估计方法对于关系数据的回归分析和统计检验将失效,因此,本文转向社会网络分析中的二次指派程序(QAP)。QAP是社会网络分析中研究关系数据之间关系的特定方法,以重复抽样和对矩阵数据的置换为基础,利用非参数方法对系数

进行统计检验。

(1) QAP相关分析。根据雾霾污染空间关联的QAP相关分析结果,在五大地区内部及全部样本城市中,所有相关系数均为正值;除了几个少数变量之外,其他变量的相关系数均通过了显著性水平检验,这表明不论是五大地区内部还是全部样本城市,雾霾污染的空间关联与六种污染物之间的空间关联均存在显著的正向相关关系。从分项污染物角度,通过对比发现,不论是五大地区内部还是全部样本城市,PM_{2.5}空间关联与AQI空间关联的相关系数均通过了1%的显著性水平检验,而且其数值在六种污染物中都是最高的,基本保持在0.80左右;PM₁₀的相关系数略低于PM_{2.5},保持在0.60—0.70左右;而其他四种分项污染物的空间关联与AQI空间关联的相关系数远低于PM_{2.5}和PM₁₀。这一结果表明,细微颗粒物尤其是PM_{2.5}的空间关联是导致城市雾霾污染空间关联最为关键的成因。

(2) QAP回归分析。在相关分析的基础上,本文对雾霾污染的空间关联进行了QAP回归分析,表2报告了QAP回归结果。①模型总体上的解释能力。根据表2的回归结果,在五大地区及全部城市的6个回归结果中,调整后的R²均通过了1%的显著性水平检验。从数值上看,京津冀的R²最高,达到0.7640,表明六种分项污染物的空间关联对京津冀地区城市雾霾污染空间关联网络的解释能力达到76.40%。对于长三角、珠三角、成渝和长中游四个地区,六种分项污染物的空间关联对各自雾霾污染空间关联网络的解释能力则分别达到66.90%、67.60%、64.50%和70.30%。对于全部样本城市来说,这种解释能力也达到70%以上。这一结果表明,不论是五大地区还是全部样本城市,六种分项污染物的空间关联对雾霾污染空间关联在总体上具有非常良好的解释能力。②回归系数与雾霾污染空间关联的成因分析。根据表2的回归结果,PM_{2.5}空间关联矩阵的回归系数在每一列回归结果中都通过了1%的显著性水平检验,且其数值均远高于所在列的其他变量的回归系数,这一结果清晰地表明,PM_{2.5}的空间关联是导致雾霾污染空间关联的主要成因。与PM_{2.5}空间关联矩阵的回归系数相比,PM₁₀空间关联的回归系数在京津冀、长三角、珠三角、长中游及全部城市样本中的回归系数也通过了1%的显著性水平检验,但其数值远低于PM_{2.5}的回归系数,保持在0.20—0.30左右;而在成渝地区,PM₁₀空间关联的回归系数仅为0.1035,在统计上却并不显著。而对于其他四种分项污染物,它们的回归系数不仅数值非常小,而且在多数回归中没有通过显著性水平检验。例如京津冀和长三角地区的SO₂、NO₂和O₃、珠三角地区的CO和NO₂、长中游地区的CO、NO₂和O₃、全部城市样本中的SO₂和NO₂,它们的空间关联矩阵的回归系数

均没有通过显著性水平检验。而在成渝地区,只有 $PM_{2.5}$ 空间关联的回归系数通过了显著性水平检验,其他五种分项污染物空间关联的回归系数在统计上均不显著。上述回归结果表明,尽管雾霾污染空间关联在不同地区受到不同污染物空间关联的影响存在一定差异,但却存在一个共同的特征,即 $PM_{2.5}$ 的空间关联是导致大气污染空间关联的主要成因。因此, $PM_{2.5}$ 的跨城市、跨区域协同防控构成了雾霾污染联防联控的重中之重。

3.2 城市雾霾污染的影响因素及其空间关联

为了探寻雾霾污染的跨区域协同治理的途径,在实证考察雾霾污染影响因素的基础上,采用空间统计中的双变量 Moran's I 指数来刻画雾霾污染与其影响因素之间的空间相关性,进而揭示一个地区的雾霾污染与其他地区影响因素之间的空间关联程度。考虑到数据的可得性以及影响因素对雾霾污染的影响在时间上的累积性,本文分别考察经济规模(以城市地区生产总值表示)、人口规模(以城

市年平均人口数表示)、人口密度(以单位面积的人口数量表示)、工业规模(以城市工业总产值表示)、建设用地规模(以城市建设用地面积表示)、投资规模(以城市固定资产投资表示)、投资密度(以固定资产投资总额与城市行政面积之比表示)、工业排放规模(以城市工业 SO_2 排放量表示)等八个因素与雾霾污染之间的关系。影响因素数据全部来源于《中国城市统计年鉴》;城市 AQI 及六种分项污染物数据按年度均值处理。表 3 报告了雾霾污染与影响因素之间的双变量 Moran's I 指数测度结果。

在不考虑空间关联情形下,AQI 与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的影响因素及其效应基本一致,三者与人口规模、人口密度、投资规模、投资密度及工业排放之间均存在显著的正向相关关系,而与经济规模、工业规模 and 建设用地之间尽管存在正的相关关系,但统计上并不显著。在其他分项污染物中, O_3 仅与工业规模之间在 10% 的显著性水平下存在正向相关关系,人口密度、工业排放与 SO_2 、CO、 NO_2 之间均存在

表 2 雾霾污染空间关联的 QAP 回归结果

Tab. 2 QAP regression results of spatial correlation of haze pollution

变量矩阵	京津冀	长三角	珠三角	成渝	长中游	全部城市
Intercept	-0.037 3	0.020 5	-0.019 6	-0.025 8	-0.039 1	-0.013 3
$PM_{2.5}$	0.651 3 ***	0.665 0 ***	0.542 0 ***	0.701 2 ***	0.670 8 ***	0.647 7 ***
PM_{10}	0.211 5 ***	0.215 8 ***	0.320 3 ***	0.103 5	0.204 8 ***	0.286 2 ***
SO_2	0.030 4	0.012 0	0.044 9 *	0.030 2	0.085 3 **	0.008 1
CO	0.149 0 ***	0.069 7 ***	0.016 2	0.063 1	-0.014 0	0.018 6 ***
NO_2	-0.048 7	0.018 1	0.011 7	0.042 6	0.051 7	0.007 4
O_3	0.044 4	-0.025 2	0.093 3 ***	0.082 6	0.056 4	0.014 4 **
Adj-R ²	0.764 0 ***	0.669 0 ***	0.676 0 ***	0.645 0 ***	0.703 0 ***	0.721 0 ***
Obs.	156	1 722	420	72	110	9 120

注: *、**、*** 分别表示 10%、5%、1% 的显著性水平。

表 3 雾霾污染与其影响因素的双变量 Moran's I 指数测度结果

Tab. 3 Bivariate Moran's I between haze pollution and its influence factors

变 量	AQI	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2	O_3
经济规模	0.078 6 **	0.065 1 **	0.080 6 **	0.081 7 ***	0.010 2	0.050 0 *	0.057 2 *
人口规模	0.269 8 ***	0.258 0 ***	0.273 7 ***	0.178 6 ***	0.126 1 **	0.162 8 ***	-0.057 7 **
人口密度	0.340 4 ***	0.315 6 ***	0.359 4 ***	0.324 4 ***	0.289 9 ***	0.228 8 ***	0.030 9
工业规模	0.050 2 *	0.035 0	0.045 2 *	0.049 1 *	-0.043 8 *	0.042 7 *	0.121 6 ***
建设用地	0.121 8 ***	0.109 8 ***	0.129 3 ***	0.126 8 ***	0.068 9 **	0.060 6 **	-0.010 5
投资规模	0.273 1 ***	0.253 2 ***	0.267 8 ***	0.212 8 ***	0.096 3 ***	0.166 5 ***	0.036 6
投资密度	0.398 3 ***	0.367 1 ***	0.395 1 ***	0.382 8 ***	0.257 5 ***	0.284 9 ***	0.098 2 ***
工业排放	0.243 9 ***	0.229 3 ***	0.260 0 ***	0.206 0 ***	0.212 6 ***	0.148 1 ***	-0.085 5 ***

注: *、**、*** 分别表示 10%、5%、1% 的显著性水平。

显著正向相关关系,而 NO_2 与所有影响因素之间均存在显著正向相关关系。这一结果表明,经济规模并非城市雾霾污染的主要诱因,因为,在城市经济不断增长的过程中,往往伴随着经济结构的调整优化。因此,经济规模不断扩张以及经济结构不断优化在一定程度上不仅不会加重大气污染,反而有助于改善大气污染状况。而城市人口因素尤其是人口密度、城市投资扩张规模和强度、工业排放规模则成为影响城市雾霾污染的关键因素。在快速城市化进程中,大量外来人口涌入城市尤其是大城市,给城市雾霾污染带来了巨大压力,这与当前中国雾霾污染的空间分布格局是完全一致的,即人口密度越大的地区大气污染就越严重。同时,传统的以“高投入、高消耗、高排放”为特征的粗放型城市发展模式,在推动城市经济高速发展的同时,也付出了巨大的资源环境代价。在城市建设中,由于城市开发强度不断增强和投资规模快速扩张,而缺少科学的空间结构规划和合理的内部空间布局,大量人口的涌入以及工业排放又难以在短时间内彻底扭转,导致城市规模与资源环境承载能力之间的矛盾日益尖锐,雾霾天气的频繁出现就是这一矛盾得不到有效解决的最主要表现之一。

在考虑空间关联的情形下,雾霾污染与其影响因素的双变量 Moran's I 指数测度结果显示,几乎所有的影响因素与 AQI 及六种分项污染物之间都存在显著的空间相关性,这表明某个地区的雾霾污染受到其他地区影响因素的制约。对比不同影响因素 Moran's I 指数的测度结果,可以发现,在八个影响因素当中,投资密度、人口密度与雾霾污染之间的空间相关性最强,这意味着某个地区的城市投资强度和人口密度越大,则其邻近地区的雾霾污染就越严重。此外,投资规模、工业排放和人口规模与雾霾污染之间的空间相关性也比较强,而经济总量、工业规模和建设用地尽管在多数情况下显著为正,但其数值相对较低,与雾霾污染的空间相关性相对较弱。因此,在城市建设过程中,针对雾霾污染的空间关联,区域之间要在合理控制城市人口规模和城市投资强度以及工业减排等方面加强协同性。更进一步地,在加快构建并不断完善雾霾污染跨区域联防联控机制的同时,将雾霾污染的联防联控融入到区域协同发展战略当中,促进区域人口、经济和社会的协同发展,与雾霾污染联防联控实现良性互动。

4 结论与政策启示

4.1 研究结论

(1) 城市雾霾污染在地区内部和地区之间均存在普遍的动态关联关系,而且这种关联关系已经超越了地理距离的限制并交织在一起,呈现出联系紧密的多线程复杂网络分布态势。相对于全部样本城市,雾霾污染在五大地区

内部的关联网络具有更强的稳定性;而在分项污染物中, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的空间关联网络的稳定性明显强于其他四种分项污染物。雾霾污染的空间关联网络不仅联系紧密,而且带有明显的小世界特征,AQI 及六种分项污染物在任意两个城市节点之间通过 1—2 个中间城市就可以建立联系,进一步促进了城市雾霾污染之间的联系。

(2) AQI 的空间关联与六种污染物之间的空间关联均存在显著的正向相关关系。其中, $\text{PM}_{2.5}$ 空间关联与 AQI 空间关联的相关性最强,基本保持在 0.80 左右; PM_{10} 的相关系数略低于 $\text{PM}_{2.5}$,保持在 0.60—0.70 左右;而其他四种分项污染物的空间关联与 AQI 空间关联的相关系数远低于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 。QAP 回归分析进一步表明,尽管城市雾霾污染空间关联在不同地区受到不同污染物空间关联的影响存在一定差异,但细微颗粒物尤其是 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间关联是导致城市雾霾污染空间关联最为关键的成因。

(3) 在雾霾污染的诸多因素当中,城市人口密度、城市投资扩张规模和强度、工业排放规模是影响城市大气污染的关键因素。在空间关联上,所有的影响因素与 AQI 及六种分项污染物之间都存在显著的空间相关性,意味着某个地区的雾霾污染将受到其他地区影响因素的制约。其中,城市投资密度、人口密度、投资规模、工业排放和人口规模等五个影响因素与雾霾污染之间存在较强的空间相关性。而经济总量、工业规模和建设用地在多数情况下与雾霾污染的空间相关性相对较弱。

4.2 政策启示

(1) 面对雾霾大气污染的空间关联网络和动态交互影响,创新雾霾污染联防联控体系,形成跨区域治污合力势在必行。目前,京津冀、长三角、珠三角等地区已经初步构建起大气污染联防联控机制,而且上海、天津、安徽、江苏等多个省份也陆续制定实施了省级层面的大气污染防治条例。面对城市雾霾污染的空间关联及其网络结构,在一个地区内部,没有哪个城市的空气质量能够独善其身,即使某个城市做出了治理雾霾污染的努力,尽管在短期内可能会使当地的空气质量略有好转,但雾霾污染空间关联网络将很快抵消它所做出的努力。因此,在地区内部率先开展雾霾污染的联防联控,进而构建跨区域的联防联控体系,是从整体上解决当前雾霾污染问题的必然选择。

(2) 雾霾污染已成为所有城市共同面对的困境,局部的雾霾污染治理并不能从根本上解决全国雾霾污染问题,建立跨地区的大气污染联防联控机制尤显紧迫。“不谋全局者,不能谋一域”。面对雾霾污染的空间关联网络和动态交互影响,要树立全局意识,从更大格局重新审视区域大气污染问题。建立雾霾污染跨区域联防联控体系的一个可行思路是,依托于五大国家级城市群所在地区,以上

述地区中心城市为中心,在各个地区内部建立雾霾污染联防联控机制的基础上,不断拓展雾霾污染联防联控的区域边界,并逐步将多个地区雾霾污染联防联控体系有效地联接在一起,最终构建一个以地区中心城市为中心的、以 $PM_{2.5}$ 为协同防控重点的跨区域雾霾污染联防联控体系。在雾霾污染联防联控基本实现区域全覆盖的基础上,形成强有力的治污合力,加快实现雾霾污染的协同治理。

(3) 在城镇化战略实施的关键时期,为了有效应对雾霾污染的空间关联,区域之间要在合理控制城市人口规模和城市投资强度以及工业减排等方面加强协同性。更进一步的,在加快构建并不断完善雾霾污染跨区域联防联控机制的同时,将雾霾污染的联防联控融入到城市群发展战略以及区域协同发展战略之中,不断促进区域人口、经济和社会的协同发展与雾霾污染联防联控之间的互动,最终在最大限度提升协同治污效果的同时,实现更大空间范围内的全方位区域协同发展。然而,要确保雾霾污染联防联控机制取得成效,仍面临诸多困难。为此,要落实好雾霾污染在城市间、地区之间的联防联控,必须要求网络中的所有城市和地区要首先做好自身的雾霾污染治理,否则在缺少一个协调机制和考核机制的前提下,多个个体之间最终博弈的结果是没有哪个城市和地区愿意做出更多的污染防治努力,最终降低联防联控的效果。此外,雾霾污染联防联控强调的“联”,在一定程度上仍是“治标不治本”的一种措施,要确保空气质量的彻底改善,最根本的途径是要转变生产方式和生活方式,加快实现绿色发展,换言之,绿色发展是雾霾污染治理的必经之路和最终选择。

(编辑:刘照胜)

参考文献(References)

- [1] BAI X, SHI P, LIU Y. Society: realizing China's urban dream [J]. Nature, 2014, 509: 158 - 160.
- [2] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 跨区域传输特征数值模拟研究 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1361 - 1368. [XUE Wenbo, FU Fei, WANG Jinnan, et al. Numerical study on the characteristics of regional transport of $PM_{2.5}$ in China [J]. China environmental science, 2014, 34(6): 1361 - 1368.]
- [3] QIN M, WANG X, HU Y, et al. Formation of particulate sulfate and Nitrate over the Pearl River Delta in the fall: diagnostic analysis using the community multiscale air quality model [J]. Atmospheric environment, 2015, 112: 81 - 89.
- [4] 胡晓宇, 李云鹏, 李金凤, 等. 珠江三角洲城市群 PM_{10} 的相互影响研究 [J]. 北京大学学报, 2011, 47(3): 519 - 524. [HU Xiaoyu, LI Yunpeng, LI Jinfeng, et al. Interaction of ambient PM_{10} among the cities over the Pearl River Delta [J]. Acta scientiarum naturalium universitatis pekinesis, 2011, 47(3): 519 - 524.]
- [5] LI L, HUANG C, HUANG H, et al. An integrated process rate analysis of a regional fine particulate matter episode over Yangtze

- River Delta in 2010 [J]. Atmospheric environment, 2014, 91: 60 - 70.
- [6] 向望, 宋德勇. 中国省域 $PM_{2.5}$ 污染的空间实证研究 [J]. 中国人口·资源环境, 2015, 25(9): 153 - 159. [XIANG Kun, SONG Deyong. Spatial analysis of China's $PM_{2.5}$ pollution at the provincial level [J]. China population, resources and environment, 2015, 25(9): 153 - 159.]
- [7] YANG N, JI D, LI S. The application of pearson correlational analysis method in air quality analysis of Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Agricultural science & technology, 2015, 16(3): 590 - 593.
- [8] 马丽梅, 张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响 [J]. 中国工业经济, 2014(4): 19 - 31. [MA Limei, ZHANG Xiao. The spatial effect of China's haze pollution and the impact from economic change and energy structure [J]. China industrial economics, 2014(4): 19 - 31.]
- [9] 张殷俊, 陈曦, 谢高地, 等. 中国细颗粒物($PM_{2.5}$)污染状况和空间分布 [J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1339 - 1346. [ZHANG Yinjun, CHEN Xi, XIE Gaodi, et al. Pollution status and spatial distribution of $PM_{2.5}$ in China [J]. Resources science, 2015, 37(7): 1339 - 1346.]
- [10] WANG Y, YING Q, HU J, et al. Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013 - 2014 [J]. Environment international, 2014, 73: 413 - 422.
- [11] 任婉侠, 薛冰, 张琳, 等. 中国特大型城市空气污染指数的时空变化 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2788 - 2796. [REN Wanxia, XUE Bing, ZHANG Lin, et al. Spatiotemporal variations of air pollution index in China's megacities [J]. Chinese journal of ecology, 2013, 32(10): 2788 - 2796.]
- [12] 李婕, 腾丽. 珠三角城市空气质量的时空变化特征及影响因素 [J]. 城市观察, 2014(5): 85 - 95. [LI Jie, TENG Li. The time-space Characteristics and determinants of urban air quality in Pearl River Delta [J]. Urban insight, 2014(5): 85 - 95.]
- [13] 刘华军, 刘传明, 孙亚男. 中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究 [J]. 中国工业经济, 2015(5): 83 - 95. [LIU Huajun, LIU Chuanming, SUN Yanan. Spatial correlation network structure of energy consumption and its effect in China [J]. China industrial economics, 2015(5): 83 - 95.]
- [14] 刘华军, 刘传明, 杨骞. 环境污染的空间溢出及其来源——基于网络分析视角的实证研究 [J]. 经济学家, 2015(10): 28 - 35. [LIU Huajun, LIU Chuanming, YANG Qian. Spatial spillover and the source of environment pollution: empirical study on the perspective of network analysis [J]. Economist, 2015(10): 28 - 35.]
- [15] HU J, WANG Y, YING Q, et al. Spatial and temporal variability of $PM_{2.5}$ and PM_{10} over the North China Plain and the Yangtze River Delta [J]. China atmospheric environment, 2014, 95: 598 - 609.
- [16] 刘华军, 何礼伟. 中国省际经济增长的空间关联网络结构——

- 基于非线性 Granger 因果检验方法的再考察 [J]. 财经研究, 2016, 42(2): 97 - 107. [LIU Huajun, HE Liwei. The spatial network structure of China's provincial economic growth: re-examination based on nonlinear granger causality test [J]. Journal of finance and economics, 2016, 42(2): 97 - 107.]
- [7] 李敬, 陈澍, 万广华, 等. 中国区域经济增长的空间关联及其解释——基于网络分析方法 [J]. 经济研究, 2014, 49(11): 4 - 16. [LI Jing, CHEN Shu, WAN Guanghua, et al. Study on the spatial correlation and explanation of regional economic growth in China: based on analytic network process [J]. Economic research journal, 2014, 49(11): 4 - 16.]
- [8] DUCRUET C, BEAUGUITTE L. Spatial science and network science: review and outcomes of a complex relationship [J]. Networks and spatial economics, 2014, 14(3-4): 297 - 316.
- [9] SCOTT J. Social network analysis: a handbook [M]. London: Sage Publication, 2013.

Dynamic correlation and causes of urban haze pollution

LIU Hua-jun¹ SUN Ya-nan² CHEN Ming-hua¹

(1. School of Economics, Shandong University of Finance and Economics, Jinan Shandong 250014, China;

2. School of Business Administration, Shandong University of Finance and Economics, Jinan Shandong 250014, China)

Abstract Facing severe challenge of regional haze pollution and its boundary expansion, it is imperative to form interregional pollution governance force through the innovation of joint prevention and control system. Based on 96 cities' daily data of air quality index (AQI) and six sub-pollutants such as $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , CO , NO_2 , O_3 of Beijing-Tianjin-Hebei region, the Yangtze River Delta, Pearl River Delta, Chengdu-Chongqing region and the middle reaches of Yangtze River, the article identified dynamic interaction effects among urban pollution with the VAR framework from the perspective of forecast capability of time series and revealed the network structure characteristic of spatial correlation of haze pollution by the method of Social Network Analysis (SNA). Meanwhile, the article used quadratic assignment program to reveal the key incentives of spatial correlation of haze pollution within sub-pollutants, and exploited bivariate Moran index to describe spatial correlation between haze pollution and its influential factors. The main results were as follows: AQI and six sub-pollutants among cities all had multithreading and dynamic correlation which presented complex network characteristic with close linkage and strong stability. Meanwhile the spatial correlation network of urban haze pollution had a significant small-world characteristic. There is no isolated urban node both within the region and in the entire sample cities, faced with haze pollution spatial correlation network, which means that no city could be immune to haze pollution, and would be all influenced by other cities that are built the spatial correlation network from inside and outside the region. In the six sub-pollutants the spatial correlation of $PM_{2.5}$ was the main cause of urban spatial correlation of haze pollution. Urban haze pollution and its influence factors, especially the urban population density, investment intensity, industrial pollution emissions, had a significant spatial correlation. Based on the above conclusion, China should accelerate to build a cross-regional air pollution joint prevention and control system with emphasis on the prevention and control of $PM_{2.5}$. And the collaborative system should be integrated into the urban agglomeration development strategy and regional development strategy to realize a full range of regional collaborative development.

Key words haze pollution; dynamic correlation; network analysis; collaborative governance